

基于 MODIS 数据的山东省近十年 AOD 时空变化特征

王萍, 汤庆新*, 梁天全, 于泉洲, 李欣 (聊城大学环境与规划学院, 山东 聊城 252059)

摘要: 利用 2010~2019 年的 MOD04_3K 气溶胶光学厚度产品数据, 从时间和空间角度分析山东省气溶胶光学厚度(AOD)变化特征。结果表明:2010~2019 年山东 AOD 年均值在 0.545~0.851 波动, 平均值为 0.706, 10 年间山东 AOD 年均值整体呈现下降趋势, 至 2019 年下降了 0.269, 下降幅度高达 33%; 山东 AOD 有明显的季节变化特征, 呈夏季高峰, 冬季最低, 采暖期 AOD 均值整体上低于非采暖期; 山东 AOD 高值区集中在北部环渤海、鲁西地区及济宁市, 而山东中部及东北部沿海地区为低值区。AOD 高值区总体分布在低海拔地区, 而 AOD 较低的区域主要位于高海拔地区, 且 AOD 时序变化趋势率与年均 AOD 空间分布特征基本保持一致。

关键词: AOD; 山东省; 时空变化; MODIS

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)11-5019-08

Spatiotemporal variation of AOD in Shandong Province in recent ten years based on MODIS data. WANG Ping, TANG Qing-xin*, LIANG Tian-quan, YU Quan-zhou, LI Xin (College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China). *China Environmental Science*, 2021,41(11): 5019~5026

Abstract: The spatial-temporal pattern of aerosol optical thickness (AOD) across Shandong Province was investigated based on MOD04_3K data from 2010 to 2019. The results showed that the annual average AOD fluctuated from 0.545 to 0.851 with a mean value of 0.706. It was a trend of decline during the last 10 years. It had a dramatically high reduction rate of 33% and eventually decreased about 0.269 by the end of 2019. The AOD had an obvious seasonal variation, with the peak value in summer and the lowest value in winter. Overall, the average value of AOD during heating periods presented to be lower than that during non-heating periods. The spatial pattern of AOD was mainly characterized with the high value in the northern Bohai Rim region, the western Shandong province and Jining City, while with low value in the northeastern coastal areas and central Shandong province. Meanwhile, high AOD values were primarily in low-altitude regions, while low AOD values were mainly in high-altitude regions. Besides, the variation trend rate of AOD time-series was basically consistent with the pattern characteristics of annual average AOD.

Key words: AOD; Shandong province; spatio-temporal variation; MODIS

大气气溶胶是指均匀分散于大气中的固体微粒和液体微粒所构成的稳定混合体系, 粒子的空气动力学直径多在 0.001~100 μm 之间^[1]。气溶胶粒子的主要来源是自然和人类活动, 前者主要来自植被、海洋、土壤, 后者主要来自化工生产、生物燃烧、土地利用变化等。大气气溶胶一方面可以通过吸收和散射太阳辐射影响地球的辐射平衡; 另一方面, 气溶胶粒子又可以作为云的凝结核间接影响降水量和水循环^[2]。因此, 研究大气气溶胶变化对于环境改善具有重要意义。作为表征气溶胶性质的重要光学参数之一, 气溶胶光学厚度(AOD)的物理意义为沿辐射传输路径, 单位截面上气溶胶的吸收和散射对太阳辐射产生的总削弱强度, 主要用来描述气溶胶对光的消减作用^[3]。目前有多种方式可以观测 AOD, 主要有地基观测和卫星遥感探测。其中地基观测数据虽精度高, 但站点分布稀疏且不均匀, 无法满足区域性研究需要, 而卫星遥感克服了地基观测在空间上的

不足, 可以进行长时间、大尺度范围的观测^[4]。现已有众多学者利用遥感数据对 AOD 的时空变化及与其他要素的联系进行了研究。罗宇翔等^[5]基于 2001~2010 年 MODIS 气溶胶光学厚度数据, 选取了 10 个代表性区域分析了中国大陆 10 年间的 AOD 时空特征及影响因素; Grgurić 等^[6]基于克罗地亚上空 MODIS 气溶胶光学厚度时空变化进行分析, 并探讨了与 PM₁₀ 的关系; 齐兵等^[7]利用 2011~2012 年杭州国家基准气候站内太阳光度计(CE-318)观测资料, 分析了杭州市 AOD 季度变化特征及其原因, 从 AOD 及 Angstrom 波长指数 α 频率分布证明杭州市主要气溶胶为城市-工业型气溶胶; 李一凡等^[8]基于 MODIS 和 CALIOP 气溶胶产品数据, 探究了我国

收稿日期: 2021-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31800367); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2017MD017); 聊城大学博士启动基金项目(318051631); 山东省大学生创新训练项目(s201910447006)

* 责任作者, 副教授, tangqingxin@lcu.edu.cn

华北地区气溶胶光学厚度与西北太平洋海洋初级生产力之间的相关性;马奋华等^[9]对中国东部 AOD 进行分级,证明不同污染等级下的气溶胶与到达地面的太阳短波辐射、地面气温、风速及降水存在不同轻重的联系;王银牌等^[10]利用 MODIS 气溶胶日产品,通过 Spearman 秩相关检验法,探究了中国大陆近 15 年的 AOD 年均值与及均值逐年变化趋势,并表明人类活动对 AOD 值变化有显著影响;刘状等^[11]结合 K-means 聚类分析方法,对中国中部和东部的气溶胶光学厚度时间序列进行分析;胡俊等^[12]利用 2006~2017 年 MODIS 气溶胶日产品,对新疆 11 个代表性城市分类,研究其时空变化特征及规律;丁莹等^[13]基于 2008~2016 年中分辨率成像光谱仪 MAIAC 的 AOD 数据,分析了长株潭城市群近 10a 来 AOD 演化特征,并利用拉格朗日混合型单粒子轨迹模式 (HYSPLIT) 及全球资料同化系统 (GDAS) 气象要素数据研究大气污染物潜在传输规律;刘雨华等^[14]基于环渤海地区气溶胶光学厚度数据进行时空研究,得到环渤海地区 AOD 表现为降低趋势,且呈现东南高西北和东北低的空间格局;Gunadhar 等^[15]分析了 2007~2016 年季风前印度次大陆 AOD 与气象和地面参数的时空动态关系,气溶胶光学厚度研究多集中于采用不同的方法,选定有代表性研究区或大范围地区,分析气溶胶光学厚度时空变化特征及与其他要素的相关性,基于 AOD 的长时间序列时空分析可以研究大气中颗粒物的时空分布特征和动态变化规律,且 AOD 的时空分布分析对评估大气污染程度和研究气溶胶气候效应具有重要意义^[16]。

山东省作为我国的经济大省,近年来随着经济的迅速发展,其大气环境问题也越来越引起人们的重视。本文基于分辨率为 3km 的 MODIS 数据针对山东省 2009~2019 年 AOD 进行时空变化特征分析,探讨山东省 AOD 的长时间变化和空间分布规律,揭示近 10 年间山东省 AOD 与多种排放污染物排放量之间的联系,以为后续研究和改善山东省大气环境质量提供理论支持和决策依据。

1 研究区概况

山东省位于我国东部沿海 (34°22.9'N~38°24.01'N, 114°47.5'E~122°42.3'E), 地处黄河下游, 东临黄海、渤海, 具有以山地丘陵为骨架、平原盆

地相互交错的地形特征。山东省气候属暖温带季风性气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。特殊的地理位置使山东省成为沿黄河经济带和渤海经济区的交汇点, 在全国经济格局中具有重要地位。除了优越的地理位置, 山东省还有发达的交通设施, 深厚的文化底蕴。

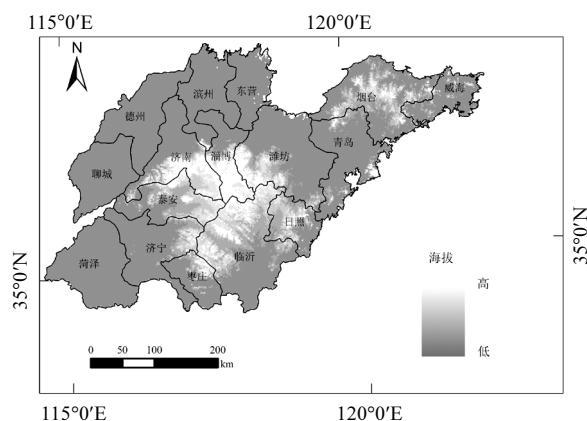


图1 山东省地形示意

Fig.1 Topographic map of Shandong Province

2 数据与方法

气溶胶光学厚度 (AOD) 可以通过卫星传感器观测数据反演获取。中等分辨率成像光谱仪 MODIS 作为 Terra 和 Aqua 卫星上搭载的主要传感器之一, 具有 36 个光谱通道, 覆盖紫外、可见光、近红外、红外等波段, 波长范围分布在 0.4~15 μ m, 数据空间分辨率为 1000m、500m 和 250m^[17]。MODIS 的轨道高度为 705km, 采用 $\pm 55^\circ$ 天底扫描方式观测, 扫描幅宽 2330km, 每 1~2d 覆盖全球 1 次, 具备更新频率高、光谱范围广等特点, 是目前应用较为广泛的气溶胶探测传感器^[18]。

采用来自 NASA 发布的 Level 2 级的 2010~2019 年 MOD04_3K 气溶胶光学厚度产品, 此产品是利用暗目标 (DT) 气溶胶算法建立的一种用来获取全球海洋和陆地环境的大气气溶胶光学特性 (如: 光学厚度和大小分布) 和质量浓度的新型的 3km 气溶胶产品。

通过 ENVI5.3 及 IDL 对 AOD 日产品做几何校正、重投影、图像镶嵌、图像叠加、图像裁剪等预处理, 得到山东省每天的 AOD 数据; 通过 MATLAB 软件进行年均值及季度均值计算及结果出图; 通过

ENVI5.3 进行时序数据变化趋势率(斜率)分析,并通过 ArcGIS10.5 出图,其中,斜率正、负号表示 AOD 变化方向,斜率绝对值表示其变化速度和程度.

3 结果与分析

3.1 时间变化分析

以山东省为研究区域,对不同年份、不同季度、采暖期与非采暖期的 AOD 进行分析研究. 为方便对不同季度的时间变化特征进行研究,文中季节变化划分是:3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季;采暖期与非采暖期时段分别设置在每年 12 月至次年 2 月和 6~9 月.

3.1.1 AOD 年变化特征 山东省近十年 AOD 均值高达 0.706,各个年份变化浮动较大.由图 2 可见,2010~2019 年,山东 AOD 年均值在 0.545~0.851,自 0.814 下降至 0.545,年均 AOD 降低了 0.269,下降幅度高达 33%,整体下降趋势明显.其中,年均 AOD 最高值出现在 2012 年,最低值出现在 2019 年.

2010 年至 2014 年,山东省年均 AOD 呈螺旋状下降.其中,2012 年 AOD 值不仅为 5 年间最高值,也为十年间 AOD 最高点. Li^[19]指出,2012 年山东省露天焚烧作物的污染排放水平明显高于中国所有其他省份,省内多发雾、霾等天气事件,全省 AOD 年均值较高. 2013 年比 2012 年下降 0.121,下降幅度为 12.1%,是 AOD 值下降幅度最大的一年;自 2014 年以后,山东省年均 AOD 更是呈现出长期稳定的快速下降趋势,下降幅度达 29.4%.

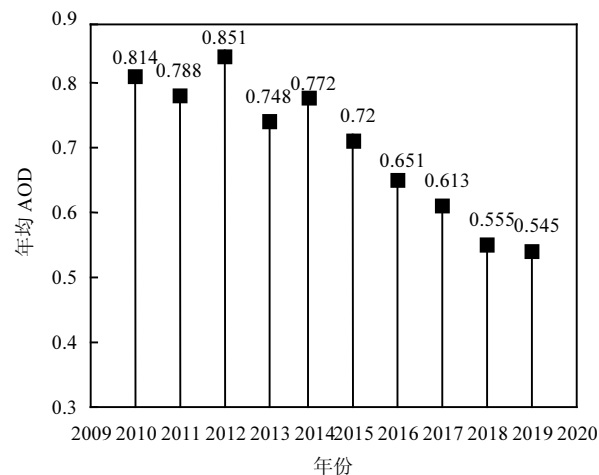


图 2 2010~2019 年 AOD 年均值变化
Fig.2 Annual mean change of AOD from 2010 to 2019

研究表明,AOD 与近地面颗粒物质量浓度、空气污染指数、空气质量指数等有很强的相关性^[20].清华大学开发并维护的中国多尺度排放清单模型(Multi-resolution Emission Inventory for China,简称 MEIC)建立了完整的排放源分类分级体系,涵盖固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源和废弃物处理源等六大类人为排放源,通过逐个排污设备计算、入户调查数据,结合逐时气象场、路网信息和交通流数据等,综合了来自电力、工业、民用、交通和农业等排放源的污染物排放量,定量解析了包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x 等 10 种主要大气污染物和温室气体的排放情况.其可按年份、模型模拟区域、行业、时空分辨率提供对应的排放清单产品^[21].通过 MEIC 模型获取山东省 2010~2017 年大气污染物数据,并对其与山东省 AOD 进行相关分析,得到图 3 与表 1.可见污染物排放量变化趋势与 AOD 年均变化情况具有一致性,且呈现出强正相关,即人为活动是导致 AOD 值较高的主要原因.

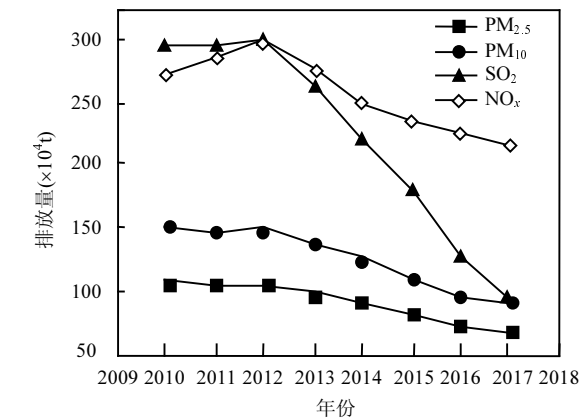


图 3 2010~2017 年污染物排放量变化
Fig.3 Changes of pollutant emissions from 2010 to 2017

表 1 AOD 与污染物排放量的相关性					
Table 1 Correlation between AOD and pollutant emissions					
污染物	均值	标准差	最大值	最小值	相关系数
PM _{2.5}	91.02	15.69	107.42	67.65	0.95
PM ₁₀	125.96	24.63	151.27	89.97	0.94
SO ₂	221.30	79.68	299.73	96.03	0.95
NO _x	256.32	30.30	298.17	214.3	0.91

注:除相关系数外其余指标单位均为×10⁴t.

研究表明,细颗粒物浓度上升是灰霾形成的主要原因^[22],霾天 AOD 显著高于清洁天气^[23]. 2014 年

以前,华北地区霾天气频发,气溶胶类型以沙尘和污染沙尘为主,其次是烟尘气溶胶,近地面还存在一定比例的来自城市排放的污染大陆型气溶胶^[24].随后,济南等城市先后出台了强有力污染治理办法,推举一系列产业升级、能源转换措施,显著改善了城市空气质量^[25].山东省在 2018 年修订的山东省大气污染防治条例第三章中,专门针对大气污染防治措施,指出要重点防治煤炭污染、工业以及相关污染、机动车船以及非道路移动机械污染、扬尘污染、农业和其他污染等^[26],使得 AOD 值持续回落.

3.1.2 AOD 季度变化特征 由图 4 及表 2 可见,山东省近十年季度 AOD 均值表现为夏季>春季>秋季>冬季.其中,夏季最高为 0.937,冬季最低为 0.452.由各年份的季度 AOD 值可见,近十年山东省各季度 AOD 均呈现下降趋势.冬季 AOD 均值十年内减少量最少,仅为 0.038,下降幅度为 7.7%.夏季 AOD 均值减少量最多,高达 0.752,下降幅度为 56.8%.其中,夏季 AOD 下降值与下降幅度最大的年份为 2016 年,由 0.989 减少至 0.647,减少了 0.342,下降幅度为 34.6%.秋季 AOD 均值十年内减少 0.24,下降幅度较大,为 31.5%;春季 AOD 均值减少 0.123,下降幅度为 18.1%,整体趋势处于较平稳状态.由此可得,近十年内季度 AOD 减少幅度表现为:夏季>秋季>春季>冬季.

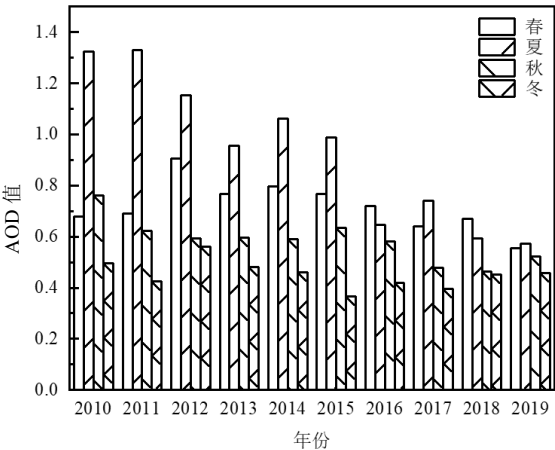


图 4 2010~2019 年 AOD 季度均值
Fig.4 Average AOD of each quarter from 2010 to 2019

由于山东位于我国东部沿海地区,气候属暖温带季风性气候类型,雨热同季.有研究通过冬夏季 Na^+/Cl^- 比值发现夏季海洋气溶胶对沿海地区 AOD 值有明显影响^[27],且夏季有利于“气-粒”转化过程

中气溶胶的生成,水溶性气溶胶吸湿膨胀,在人为活动和海洋的双重作用下,导致夏季平均的气溶胶光学厚度较高^[28];秋、冬季度气温较低,多大风,甚至常有冷空气爆发,气溶胶易扩散,AOD 季度均值低,因此呈现出春夏季度高、秋冬季度低的“倒 U 型”分布特征.

表 2 2010~2019 年各季度 AOD 均值
Table 2 Mean AOD of each quarter from 2010 to 2019

年份	春季	夏季	秋季	冬季
2010	0.678	1.324	0.761	0.496
2011	0.689	1.329	0.624	0.426
2012	0.905	1.153	0.592	0.562
2013	0.768	0.957	0.596	0.482
2014	0.795	1.063	0.589	0.461
2015	0.766	0.989	0.635	0.367
2016	0.72	0.647	0.58	0.419
2017	0.641	0.74	0.477	0.395
2018	0.671	0.594	0.464	0.452
2019	0.555	0.572	0.521	0.458
季度均值	0.719	0.937	0.584	0.452

夏季 AOD 均值最高,且变化幅度最大,季内各月 AOD 逐年变化情况如图 5 所示.根据 AOD 值变化情况可见,季内各月均有较大波动,但整体呈现下降趋势.其中,7 月份 AOD 减少量最多为 0.826,8 月份降低幅度最大为 66.8%.

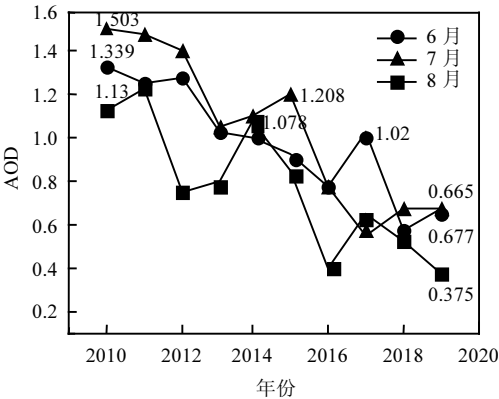


图 5 2010~2019 年夏季 AOD 月变化
Fig.5 Monthly changes of AOD in summer from 2010 to 2019

3.1.3 AOD 采暖期与非采暖期对比 图 6 为 2010~2019 年采暖期(12 月至次年 2 月)与非采暖期(6~9 月)AOD 均值对比变化.可以看出采暖期的 AOD 均值与非采暖期差异较大,采暖期的 AOD 均值整体上

低于非采暖期.由图 6 和表 3 可知,采暖期与非采暖期的 AOD 值整体上均呈现下降趋势,这与季度变化趋势保持了一致性.非采暖期 AOD 均值几乎呈现直线下降,十年内减少 0.693,降低幅度为 54.6%;采暖期 AOD 均值整体平稳,并有减小趋势.

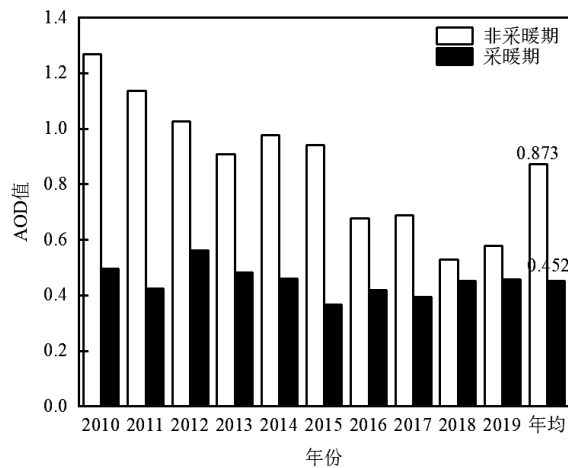


图 6 2010~2019 年采暖期与非采暖期 AOD 对比
Fig.6 Comparison of AOD between heating period and non-heating period from 2010 to 2019

表 3 2010~2019 年采暖期与非采暖期 AOD
Table 3 AOD in heating period and non-heating period from 2010 to 2019

年份	采暖期	非采暖期
2010	0.496	1.270
2011	0.425	1.136
2012	0.562	1.027
2013	0.482	0.908
2014	0.461	0.977
2015	0.367	0.940
2016	0.419	0.676
2017	0.395	0.687
2018	0.452	0.528
2019	0.458	0.577
年均	0.452	0.873

山东省属人口大省,人口总数和人口密度大,能源消耗量大,因此人为活动对采暖期产生的影响较大,造成两个时期的 AOD 均值差异较大.由于非采暖期与采暖期相比,水汽对于气溶胶含量的影响高于大气颗粒物^[29],因此采暖期的 AOD 均值整体上低于非采暖期.由于山东省的产业结构中含有较多排放 VOC 等生成二次气溶胶的工厂^[30-31],有效防治措施的实施,使得省内气溶胶逐渐减少;采暖期 AOD 均

值整体平稳,并有减小趋势,原因是山东省逐渐以天然气替代煤炭作为取暖燃料以减轻大气污染^[32].

3.2 空间变化分析

据资料显示,2013~2018 年中国大陆地区多年 AOD 均值仅有 0.324^[33],而同时段山东省 AOD 均值达 0.676,可见山东省在大陆地区中属较高值区.山东省工业发展较好,环境因素和工业因素对大气污染物都有显著影响作用,其中,工业烟尘排放、化学原料及化学制品制造业生产等因素对大气质量均有负面影响^[34],造成山东省 AOD 值较高.但由于各种因素的影响,山东省 AOD 的空间分布并不均衡,存在较大差异.

3.2.1 AOD 空间分布特征 由图 7 可见,山东省各市年均 AOD 值差距较大.AOD 高值区为北部环渤海及西部和南部地区,主要分布于潍坊、东营、滨州北部以及聊城、济宁市;AOD 低值区为山东中部及西部,主要分布于淄博南部及烟台、威海市,形成了北高南低、西高东低的分布格局.

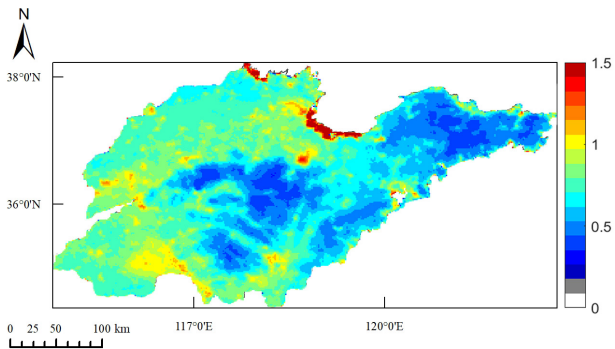


图 7 年均 AOD 空间分布
Fig.7 Spatial distribution of annual average AOD

大气中的气溶胶具有高度可变性,且其分布受地形特征影响显著^[35].与图 1 对比可见,AOD 高值区地势以平原为主,气溶胶不易扩散,AOD 值较高^[36];低值区以山地为主,地势起伏大,空气环流强,AOD 值较低^[37],因此形成了北高南低、西高东低的分布格局.

北部环渤海地区为重点高值区,位于山东与河北的交接处,属于工业集中区,且多以重工业为主,污染物较多,且易于产生细颗粒物气溶胶,由此,滞后的产业结构对环境产生了较大影响,也增加了环境治理的难度,成为了 AOD 高值区^[38].其次,聊城、济宁等是大气污染较为严重的地区,原因是该区化学化

工等重工业较多,地理位置远离海洋,气候干燥、气温高,导致气溶胶增多,AOD 值较大。

除地形原因外,淄博市南部及东北部沿海地区重点产业主要为轻工业,人为产生的颗粒物较少,且植被覆盖面积大,使得 AOD 值较低.其中,威海市三面环海,具有良好的污染物扩散条件,受海洋清洁气团影响显著,空气质量在山东省一直处于良好状态。

3.2.2 AOD 变化趋势率空间特征 由图 8 可以看出,山东省 AOD 变化趋势率差异较大,但集中于负值,表明 AOD 整体变化方向为减小.减小最明显的地区主要位于环渤海地区,山东北部、西部、西南部次之,中部和东部减小程度最轻,整体上基本与年均 AOD 空间分布特征保持一致。

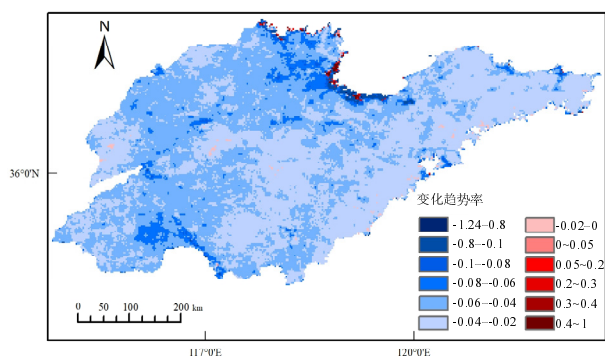


图 8 年均 AOD 时序变化趋势率空间分布

Fig.8 Spatial distribution of annual AOD temporal variation trend rate

环渤海经济区位于省交界沿海地带,过去其产业结构造成大气污染严重,AOD 值较高.近年来,环渤海经济圈产业结构逐渐高级化、合理化,实现了烟(粉)尘和 SO_2 减排,减轻了大气污染状况,AOD 减少速度快、程度大^[39].东营、聊城、济宁等地也逐渐关闭私、小作坊和工厂,使得空气质量得以改善.山东省中、东部大气环境基本保持良好状态,AOD 值常年较小,因此变化速率及程度不如其他地区。

4 结论

4.1 时间分布上,从年际变化、季度变化、采暖期与非采暖期三方面展开分析.在年际变化上,山东省年均 AOD 为 0.706,年际变化整体上呈现降低趋势,下降幅度高达 33%;在季度变化上,季度 AOD 值表现为夏季>春季>秋季>冬季,季度 AOD 减少幅度表现为夏季>秋季>春季>冬季,其中,夏季减少值与减少

幅度均最大,分别为 0.752 和 56.8%;在采暖期与非采暖期的对比上,采暖期的 AOD 均值整体上低于非采暖期,且非采暖期 AOD 值下降幅度为 54.6%,下降速度更快。

4.2 空间分布上,山东省 AOD 值在中国大陆中属较高值区,整体上呈现出北高南低、西高东低的分布格局,且 AOD 时序变化趋势率与年均 AOD 空间分布特征基本保持一致。

4.3 山东省 AOD 值在时间和空间上均体现为下降趋势,且下降速度较快,表明山东省采取的大气污染防治措施取得了良好成效。

参考文献:

- [1] 谢志英,刘 浩,唐新明.北京市 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM_{10} 质量浓度的相关性分析 [J]. 环境科学学报, 2015,35(10):3292-3299.
Xie Z Y, Liu H, Tang X M. Correlation analysis between MODIS aerosol optical depth and PM_{10} concentration over Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015,35(10):3292-3299.
- [2] 郑小波,周成霞,罗宇翔,等.中国各省区近 10 年遥感气溶胶光学厚度和变化 [J]. 生态环境学报, 2011,20(4):595-599.
Zheng X B, Zhou C X, Luo Y X, et al. Chinese province-level variations and trends in aerosol optical depth from recent 10 years of remote sensing data [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(4):595-599.
- [3] 张宸赫,赵天良,王 富,等.2003-2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 [J]. 环境科学, 2017,38(2):476-484.
Zhang Z H, Zhao T L, Wang F, et al. Variations in aerosol optical depth over three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 [J]. Environmental Science, 2017,38(2):476-484.
- [4] 玛依拉·热西丁,丁建丽,张 喆等.乌鲁木齐市气溶胶光学厚度时空分布特征及潜在来源分析 [J]. 环境科学学报, 2020,40(5):1611-1620.
Mayila Rexiding, Ding J L, Zhang Z, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and potential sources of aerosol optical depth in Urumqi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(5):1611-1620.
- [5] 罗宇翔,陈 娟,郑小波.近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征 [J]. 生态环境学报, 2012,21(5):876-883.
Luo Y X, Chen J, Zheng X B. Climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012,21(5):876-883.
- [6] Grgurić S, Krizan J, Gašparac G, et al. Relationship between MODIS based aerosol optical depth and PM_{10} over Croatia [J]. Open Geosciences, 2014,6(1):2-16.
- [7] 齐 冰,杜荣光,于之锋,等.杭州市大气气溶胶光学厚度研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(3):588-595.
Qi B, Du R G, Yu Z F, et al. Aerosol optical depth in urban site of Hangzhou [J]. China Environmental Science, 2014,34(3):588-595.
- [8] 李一凡,陈文忠.基于 MODIS 和 CALIOP 卫星遥感数据的气溶胶光学厚度与海洋初级生产力相关性 [J]. 中国环境科学, 2017,37(1):

- 76-86.
- Li Y F, Chen W Z. Correlation between aerosol optical depth and ocean primary productivity based on MODIS and CALIOP data [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(1):76-86.
- [9] 马奋华,管兆勇.中国东部AOD等级变化及与东亚夏季风的联系 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(9):3201-3210.
- Ma F H, Guan Z Y. Features of graded AOD in East China in association with East Asian summer monsoon anomalies [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(9):3201-3210.
- [10] 王银牌,喻 鑫,谢广奇.中国近 15 年气溶胶光学厚度时空分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(2):426-434.
- Wang Y P, Yu X, Xie G Q. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth over China in the past 15years [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(2):426-434.
- [11] 刘 状,石晨烈,张 萌,等.基于聚类分析的气溶胶光学厚度时间变化特征研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2019,14(6):411-418.
- Liu Z, Shi C L, Zhang M, et al. Temporal characteristics of aerosol optical depth based on cluster analysis method [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019,14(6):411-418.
- [12] 胡 俊,钟 珂,亢燕铭,等.新疆典型城市气溶胶光学厚度变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(10):4074-4081.
- Hu J, Zhong K, Kang Y M, et al. Variation in aerosol optical depth over the typical cities in the Xinjiang region [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(10):4074-4081.
- [13] 丁 莹,冯徽徽,邹 滨,等.长株潭城市群气溶胶时空分布与传输规律 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(5):1906-1914.
- Ding Y, Feng H H, Zou B, et al. Spatial-temporal distribution and transport characteristic of aerosol in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(5):1906-1914.
- [14] 刘雨华,郑小慎.环渤海地区气溶胶光学厚度数据选取及时空特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2020,40(5):1621-1628.
- Liu Y H, Zheng X S. Analysis of temporal and spatial characteristics and data selection of aerosol optical depth in the Bohai Rim Region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020,40(5):1621-1628.
- [15] Gunadhar B, Prasenjit A, Arabinda M, et al. A synergy of linear model and wavelet analysis towards space-time characterization of aerosol optical depth (AOD) during pre-monsoon season (2007~2016) over Indian sub-continent [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020,211.
- [16] 牛林芝,王旭红,韩海青,等.中亚五国气溶胶光学厚度时空分布特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2021,41(2):321-333.
- Niu L Z, Wang X H, Han H Q, et al. Spatiotemporal distribution of aerosol optical depth in the five Central Asian countries [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021,41(2):321-333.
- [17] King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992,30(1):2-27.
- [18] 李晓静,高 玲,张兴赢,等.卫星遥感监测全球大气气溶胶光学厚度变化 [J]. *科技导报*, 2015,33(17):30-40.
- Li X J, Gao L, Zhang X Y, et al. Global change of aerosol optical depth based on satellite remote sensing data [J]. *Science & Technology Review*, 2015,33(17):30-40.
- [19] Li Jing, Bo Yu, Xie Shaocong. Estimating emissions from crop residue open burning in China based on statistics and MODIS fire products [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016,44:158-170.
- [20] Jerome Vidot, Richard Santer, Didier Ramon. Atmospheric particulate matter (PM) estimation from SeaWiFS imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007,111(1):1-10.
- [21] 中国多尺度排放清单模型 MEIC [EB/OL]. <http://www.meicmodel.org/>.
- Multi-resolution Emission Inventory for China [EB/OL]. <http://www.meicmodel.org/>.
- [22] 汤玉明,邓孺孺,刘永明,等.大气气溶胶遥感反演研究综述 [J]. *遥感技术与应用*, 2018,33(1):25-34.
- Tang Y M, Deng R R, Liu Y M, et al. Research review of remote sensing for atmospheric aerosol retrieval [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018,33(1):25-34.
- [23] 芦亚玲,迟建伟,姚 兰,等.中国北部背景区域霾天气气溶胶的水溶性无机离子组分及混合状态 [J]. *中国科学:地球科学*, 2015,45(11):1728-1736.
- Lu Y L, Chi J W, Yao L, et al. Composition and mixing state of water soluble inorganic ions during hazy days in a background region of North China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015,45(11):1728-1736.
- [24] 许潇锋,刘晨璇,唐志伟,等.基于CALIPSO的华北地区气溶胶垂直分布特征 [J]. *大气科学学报*, 2018,41(1):126-134.
- Xu X F, Liu C X, Tang Z W, et al. Characteristics of aerosol vertical distribution based on CALIPSO over North China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2018,41(1):126-134.
- [25] 吴燕杰,满其霞,艾文育,等.2001~2018 年济南气溶胶光学厚度时空分布及影响因素研究 [J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(4):449-459.
- Wu Y M, Man Q X, Ai W Y, et al. Temporal and spatial distribution of aerosol optical depth and its influencing factors in jinan from 2001to 2018 [J]. *Journal of Shandong Normal University(Natural Science)*, 2020,35(4):449-459.
- [26] 山东省大气污染防治条例 [EB/OL]. <http://www.sdrd.gov.cn/articles/ch00023/201812/9d34892a-b597-4096-a3de-7878e4cc4df1.shtml>, 2018-12-05.
- Regulations of Shandong Province on prevention and control of air pollution [EB/OL]. <http://www.sdrd.gov.cn/articles/ch00023/201812/9d34892a-b597-4096-a3de-7878e4cc4df1.shtml>, 2018-12-05.
- [27] 徐新华,姚荣奎,李金龙.青岛地区大气气溶胶海洋因子贡献研究 [J]. *海洋环境科学*, 1997,(2):56-60.
- Xu X H, Yao R K, Li J L. Study on the sea contribution to atmospheric aerosol in Qingdao district [J]. *Marine Environmental Science*, 1997, (2):56-60.
- [28] 关佳欣,李成才.我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010,46(2):185-191.
- Guan J X, Li C C. Spatial distributions and changes of aerosol optical depth over Eastern and Central China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010,46(2):185-191.
- [29] 岳 辉,刘 英,张元敏.基于 MODIS 数据的中国地区气溶胶光学厚度时空变化特征 [J]. *环境污染与防治*, 2020,42(1):89-93.

- Yue H, Liu Y, Zhang Y M. Study on temporal and spatial variability of aerosol optical depth in China region based on MODIS data [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020,42(1):89-93.
- [30] 常 明,刘晓环,刘明旭,等.非采暖期和采暖期青岛市及中国东部臭氧和细颗粒物模拟研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(2):14-25.
- Chang M, Liu X H, Liu M X, et al. Simulation study of ozone and fine particulate matter in Qingdao and eastern China in non-heating and heating periods [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(2):14-25.
- [31] 陈文泰,邵 敏,袁 斌,等.大气中挥发性有机物(VOCs)对二次有机气溶胶(SOA)生成贡献的参数化估算 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1):163-172.
- Chen W T, Shao M, Yuan B, et al. Parameterization of contribution to secondary organic aerosol (SOA) formation from ambient volatile organic compounds (VOCs) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1):163-172.
- [32] 张 晶,朱兆洲,李绪威,等.煤改气后天津市采暖期大气污染特征的时空分布研究 [J]. *生态环境学报*, 2019,28(2):324-331.
- Zhang J, Zhu Z Z, Li X W, et al. Spatial and temporal distribution of atmospheric pollutants in Tianjin during winter heating period after the "coal to gas" project [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(2):324-331.
- [33] 刘 利,邓宇宸,吴 丹,等.广东省城市环境空气质量时空特征及经济影响因素分析 [J]. *中国环境监测*, 2021,37(3):40-50.
- Liu L, Deng Y C, Wu D, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics and economic influencing factors of urban ambient air quality in Guangdong Province [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021,37(3):40-50.
- [34] 林美含,张晓平.华北地区空气质量时空变化特征及其影响因素探究 [C]//2019 年中国地理学会经济地理专业委员会学术年会摘要集, 2019.
- Lin M H, Zhang X P. Spatiotemporal variation of air quality in North China and its influencing factors [C]//Abstract of the Academic Annual Meeting of Economic Geography Committee of Chinese Geographical Society in 2019, 2019.
- [35] 王 雁,郭 伟,闫世明,等.山西省气溶胶光学厚度时空变化特征及气候效应分析 [J]. *生态环境学报*, 2018,27(5):900-907.
- Wang Y, Guo W, Yan S M, et al. Analysis of spatio-temporal variation of aerosol optical depth and climatic effects in Shanxi Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018,27(5):900-907.
- [36] Miao Zhang, Jing Liu, Muhammad Bilal, et al. Optical and Physical Characteristics of the Lowest Aerosol Layers over the Yellow River Basin [J]. *Atmosphere*, 2019,10(10).
- [37] 纪晓璐,廉丽姝,周甜甜,等.基于MODIS数据的环渤海地区气溶胶时空变化特征分析 [J]. *环境污染与防治*, 2017,39(11):1238-1241, 1245.
- Ji X L, Lian L S, Zhou T T, et al. Temporal and spatial variation characteristics analysis of around Bohai Sea region based on MODIS data [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017,39(11):1238-1241,1245.
- [38] 侯思远,刘雨华,郑小慎,等.基于MODIS数据气溶胶光学厚度特征分析 [J]. *海洋信息*, 2019,34(2):36-42.
- Hou S Y, Liu Y H, Zheng X S, et al. Analysis of Aerosol Optical Thickness Characteristics Based on MODIS Data [J]. *Marine Information*, 2019,34(2):36-42.
- [39] 吴振信,闫洪举.产业结构变迁对环渤海经济圈大气污染物排放的影响 [J]. *商业研究*, 2015,(6):30-35.
- Wu Z X, Yan H J. The effects of industrial structure change on Bohai Rim Region Economic Circle's air pollution [J]. *Commercial Research*, 2015,(6):30-35.

致谢: 感谢美国航空航天局(NASA)提供的 MOD04_3K 气溶胶光学厚度产品。

作者简介: 王 萍(1998-),女,山东潍坊人,聊城大学硕士研究生,主要从事遥感技术在生态环境中的应用方面研究。